

УДК 621.313

**О. Шаблій, докт. фіз.-мат. наук; Ч. Пулька, докт. техн. наук; М. Базар;
О. Король**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ, ЩО ПРОТІКАЄ В ІНДУКТОРІ НАГРІВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

Резюме Розроблено нові індукційні енергозберігаючі нагрівальні прилади, які складаються з двох теплообмінників (внутрішнього та зовнішнього), а також електричного індуктора, приєднаного до мережі змінного струму. Визначено зведені струми, що індукуються у зовнішньому та внутрішньому теплообмінниках. Розроблено схему заміщення індуктора з урахуванням навантаження від двох теплообмінників, а також враховано власний імпеданс індуктора. Проаналізовано можливість використання схеми заміщення індуктора для системи з одним теплообмінником (внутрішнім або зовнішнім). Також визначено повний струм, що протікає в індукторі, наведено вирази для обчислення його активної та реактивної складових.

Ключові слова: струми Фуко, сила струму, повний комплексний опір, закон Ома, напруженість магнітного поля, індуктор, електронагрівач.

O. Shablii, Ch. Pulka, M. Basar, O. Korol

METHOD OF CURRENT FLOWING IN AN INDUCTOR HEATING APPARATUS

Summary. Different gas and electric devices which consume sufficient resource (electricity and gas) because of their low efficiency are used now in engineering and construction for heating of buildings and other dwelling houses. Electric devices using induction heating have found wide application lately. Usage of electric energy for heating of buildings and other dwelling houses are analysed in the paper. The latest investigations in the field of induction heating devices are analysed. New induction energy-saving heating device, which consist of two heat exchangers (internal and external) and the electric inductor, connected to the ac source, have been developed by the authors. Reduced currents induced in the internal and external heat exchangers have been found. The scheme of the inductor substitution taking into account the loading from two heat exchangers and the inductor own impedance, has been developed. Besides, the complete current which flows in the inductor has been found. Expressions for calculation of its active and reactive component are presented. Saving of energy resources and looking for the alternative sources and methods of producing energy and their mutual transformation is the most urgent and competitive problem in modern world economy. Natural

resources of fossil, fuels gas and oil, are coming to an end, but the pace of their consumption is increasing. Electric heating systems are the promising direction of the development of the heat power engineering of Ukraine. This is the path towards the energy security and independence from the scarce fossil fuels resources. The problem of ecological safety is urgent in the world. Thus, electrical heating systems are the leaders, even when compared with those running on the biofuels, as the electrical devices do not produce any gases and the electrical energy can be produced by transformation of the wind and solar energy and by other eco-friendly methods. Besides, Ukraine produces enough energy. Modern electric heaters consume much electricity and as compared with the gas heating systems they are more expensive with low durability, TEN-type in particular, in which pipe-type electric heaters can not operate because of heating deposit. Taking into account everything mentioned, as well as the situation we happened to be, it is necessary to develop new electric devices, which would be more efficient and durable than conventional ones. It should be noted that while developing the device, the authors took advantage of fundamental laws of physics. The solutions were built on the basis of the Maxwell equations, the law of complete current, the Joule-Lenz law, the Kirchhoff's rules and the Ohm's law. Only the method for finding the current force in the inductor, which is the main power characteristic of the designed device, has been analyzed in the paper, because due to the current force the efficiency of the heating device can be found. Besides, the temperature of the heat carrier will depend on the current force.

Key words: *currents force, complete comprehensive resistance, law of Ohm, tension of magnetic-field, inductor, electro-heater.*

Постановка проблеми. В даний час в техніці і будівництві при опаленні житлових і побутових приміщень використовують різні газові й електричні прилади, які пов'язанні зі значними затратами ресурсів (електроенергії і газу) через їх неекономічність. Широке застосування на сьогодні знайшли електроприлади з використанням індукційного нагрівання [1, 2]. Однак в літературних джерелах теоретичні дослідження для їх конструювання і виготовлення з урахуванням геометричних розмірів, конфігурації та матеріалів, із яких вони виготовлені, відсутні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори розробили нові енергоефективні прилади для опалення приміщень із використанням індукційного нагрівання [3, 4, 5]. Як показали експериментальні дослідження, вони значно переважають існуючі прилади з точки зору економії електроенергії, простоти конструкції і надійності в роботі, а також значно дешевші та простіші в експлуатації.

Однак для їх удосконалення, тобто визначення електричних параметрів нагрівального приладу, необхідно провести теоретичні дослідження, які б враховували економічну ефективність їх у порівнянні з існуючими нагрівальними приладами.

Метою роботи є визначення сили струму, який протікає в індукторі, тобто струму, спожитого з мережі, а також приведених струмів, які циркулюють у зонах теплообмінника.

Результати дослідження. Розглянемо електричний опалювальний прилад, розрахункова схема якого зображена на рис. 1. Струм, який протікає в індукторі, індукуює в зонах струми Фуко, які нагрівають ці зони. Визначимо силу струму, яка протікає у відповідних зонах, силу струму, що активно сприяє нагріванню, та силу струму, спожиту з мережі.

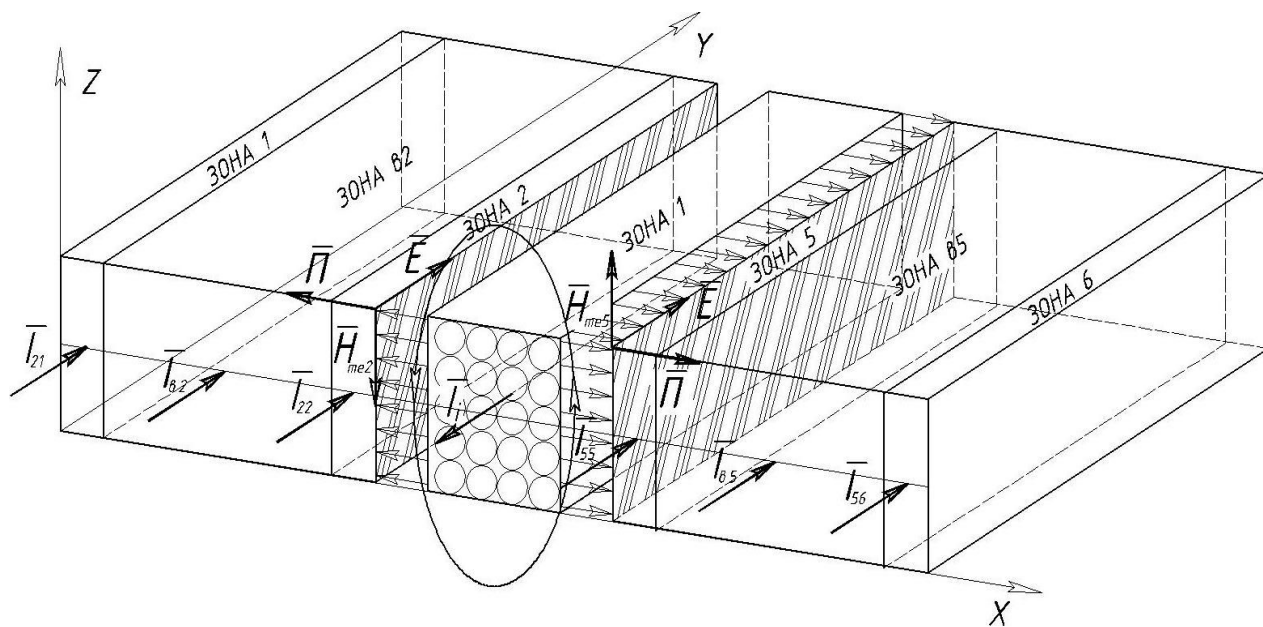


Рисунок 1. Розрахункова схема пристрою:

\vec{P} – вектор Пойтінга; \vec{E} – напруженість електричного поля; \vec{H} – напруженість магнітного поля;

\vec{I} – струм відповідної зони

Figure 1. Design model of the device:

\vec{P} – vector Poynting; \vec{E} – electric field intensity; \vec{H} – magnetic field; \vec{I} – current of the zone

Виходячи з першого закону Кірхгофа [6], маємо, що струм в індукторі і струм індукований в технологічному індукторі у сумі дорівнюють нулю. В результаті цього можна записати

$$\dot{I}_i = \dot{I}_2 + \dot{I}_5, \quad (1)$$

де \dot{I}_i – корисний струм, що протікає в індукторі, А; \dot{I}_2 – зведений струм, що індукується в зовнішньому технологічному індукторі, А; \dot{I}_5 – зведений струм, що індукується у внутрішньому технологічному індукторі, А.

Таким чином за допомогою закону Ома отримаємо

$$\frac{U}{\dot{Z}_i} - \frac{U'_2}{\dot{Z}_2} - \frac{U'_5}{\dot{Z}_5} = 0 \Rightarrow \frac{1}{\dot{Z}_i} - \frac{1}{\dot{Z}_2} - \frac{1}{\dot{Z}_5} = 0,$$

де U – напруга на індукторі, В; U'_2, U'_5 – зведена напруга що наводиться відповідно у зовнішньому та внутрішньому технологічних індукторах, В; \dot{Z}_i – повний комплексний опір навантаження індуктора, Ом; \dot{Z}_2 – повний комплексний опір системи 2, Ом; \dot{Z}_5 – повний комплексний опір системи 5, Ом.

З останнього виразу бачимо, що в колі має місце паралельне з'єднання провідників (рис. 2), при цьому маємо $U = U'_2 = U'_5$.

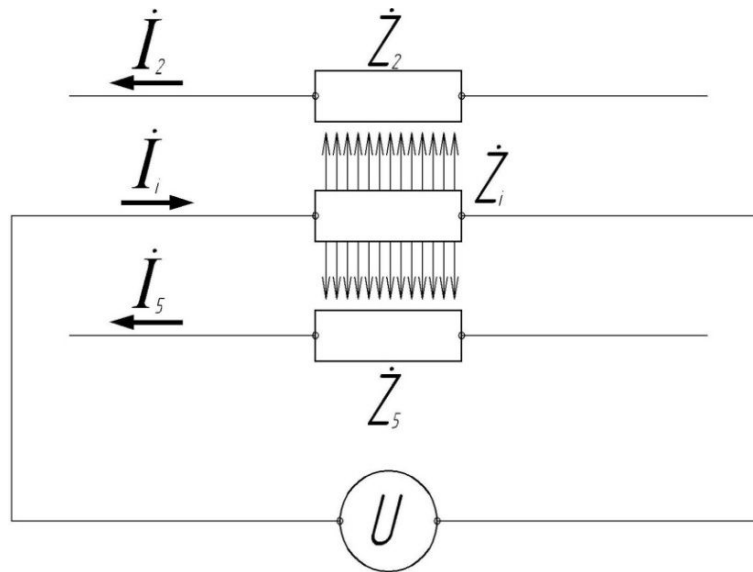


Рисунок 2. Схема для електричного розрахунку нагрівального пристрою (позн. див. у тексті)

Figure 2. Scheme for the calculation of the electric heating device (see pozn. In the text)

Відзначимо також, що струм \dot{I}_2 та \dot{I}_5 є сумарним зведеним струмом, він складається зі струмів, що циркулюють у відповідних зонах, а саме

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{22} + \dot{I}_{2B} + \dot{I}_{21}, \quad (2)$$

де \dot{I}_{22} – зведений струм, що індукується у зоні 2, А

$$\dot{I}_{22} = U \frac{1}{\dot{Z}_{22}} = U \frac{1}{R_{22} + i\omega L_{22}} = U \frac{R_{22} + i\omega L_{22}}{R_{22}^2 + \omega^2 L_{22}^2}; \quad (3)$$

\dot{I}_{2B} – зведений струм, що індукується у зоні теплоносія в2, А

$$\dot{I}_{2B} = U \frac{1}{\dot{Z}_{2B}} = U \frac{1}{R_{2B} + i\omega L_{2B}} = U \frac{R_{2B} + i\omega L_{2B}}{R_{2B}^2 + \omega^2 L_{2B}^2}; \quad (4)$$

\dot{I}_{21} – зведений струм, що індукується у зоні 1, А

$$\dot{I}_{21} = U \frac{1}{\dot{Z}_{21}} = U \frac{1}{R_{21} + i\omega L_{21}} = U \frac{R_{21} + i\omega L_{21}}{R_{21}^2 + \omega^2 L_{21}^2}. \quad (5)$$

Аналогічно і для зони 5

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_{55} + \dot{I}_{5B} + \dot{I}_{56}, \quad (6)$$

де \dot{I}_{55} – зведений струм, що індукуюється у зоні 5, А

$$\dot{I}_{55} = U \frac{1}{\dot{Z}_{55}} = U \frac{1}{R_{55} + i\omega L_{55}} = U \frac{R_{55} + i\omega L_{55}}{R_{55}^2 + \omega^2 L_{55}^2}; \quad (7)$$

\dot{I}_{5B} – зведений струм, що індукуюється у зоні теплоносія в5, А

$$\dot{I}_{5B} = U \frac{1}{\dot{Z}_{5B}} = U \frac{1}{R_{5B} + i\omega L_{5B}} = U \frac{R_{5B} + i\omega L_{5B}}{R_{5B}^2 + \omega^2 L_{5B}^2}; \quad (8)$$

\dot{I}_{56} – зведений струм, що індукуюється у зоні 6, А

$$\dot{I}_{56} = U \frac{1}{\dot{Z}_{56}} = U \frac{1}{R_{56} + i\omega L_{56}} = U \frac{R_{56} + i\omega L_{56}}{R_{56}^2 + \omega^2 L_{56}^2}. \quad (9)$$

Запишемо струми у вигляді

$$\dot{I} = I_a + iI_p. \quad (10)$$

Тут і далі будемо позначати активний струм з індексом «а», відповідно реактивний – «р»:

$$\dot{I}_{22} = I_{22a} + iI_{22p}, \quad (11)$$

$$\dot{I}_{2B} = I_{2Ba} + iI_{2Bp}, \quad (12)$$

$$\dot{I}_{21} = I_{21a} + iI_{21p}, \quad (13)$$

де

$$I_{22a} = U \frac{R_{22}}{R_{22}^2 + \omega^2 L_{22}^2}$$

$$I_{2Bp} = U \frac{i\omega L_{2B}}{R_{2B}^2 + \omega^2 L_{2B}^2}$$

$$I_{22p} = U \frac{i\omega L_{22}}{R_{22}^2 + \omega^2 L_{22}^2}$$

$$I_{21a} = U \frac{R_{21}}{R_{21}^2 + \omega^2 L_{21}^2}$$

$$I_{2B} = U \frac{R_{2B}}{R_{2B}^2 + \omega^2 L_{2B}^2}$$

$$I_{21p} = U \frac{i\omega L_{21}}{R_{21}^2 + \omega^2 L_{21}^2}$$

Тут R_{22}, R_{2B}, R_{21} – відповідно активні опори зони 2, зони в2 та зони 1, Ом; L_{22}, L_{2B}, L_{21} – відповідні індуктивності зони 2, зони в2 та зони 1, Гн; ω – циклічна частота, c^{-1} , $\omega=2\pi f$, тут f – частота струму в індукторі, Гц.

Відповідно струми в системі 5

$$\dot{I}_{55} = I_{55a} + iI_{55p}, \quad (14)$$

$$\dot{I}_{5B} = I_{5Ba} + iI_{5Bp}, \quad (15)$$

$$\dot{I}_{56} = I_{56a} + iI_{56p}, \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned} I_{55a} &= U \frac{R_{55}}{R_{55}^2 + \omega^2 L_{55}^2} & I_{5Bp} &= U \frac{i\omega L_{5B}}{R_{5B}^2 + \omega^2 L_{5B}^2} \\ I_{55p} &= U \frac{i\omega L_{55}}{R_{55}^2 + \omega^2 L_{55}^2} & I_{56a} &= U \frac{R_{56}}{R_{56}^2 + \omega^2 L_{56}^2} \\ I_{5B} &= U \frac{R_{5B}}{R_{5B}^2 + \omega^2 L_{5B}^2} & I_{56p} &= U \frac{i\omega L_{56}}{R_{56}^2 + \omega^2 L_{56}^2} \end{aligned}$$

Тут R_{55}, R_{5B}, R_{56} – відповідно активні опори зони 5, зони в5 та зони 6, Ом; L_{55}, L_{5B}, L_{56} – відповідні індуктивності зони 5, зони в5 та зони 6, Гн.

Перепишемо формули (2) та (3), використовуючи вирази (11)–(13) та (14)–(16).
Матимемо для системи 2

$$\dot{I}_2 = U \left(\frac{R_{22}}{R_{22}^2 + \omega^2 L_{22}^2} + \frac{i\omega L_{22}}{R_{22}^2 + \omega^2 L_{22}^2} + \frac{R_{2B}}{R_{2B}^2 + \omega^2 L_{2B}^2} + \frac{i\omega L_{2B}}{R_{2B}^2 + \omega^2 L_{2B}^2} + \frac{R_{21}}{R_{21}^2 + \omega^2 L_{21}^2} + \frac{i\omega L_{21}}{R_{21}^2 + \omega^2 L_{21}^2} \right) \quad (17)$$

Аналогічно для системи 5

$$\dot{I}_5 = U \left(\frac{R_{55}}{R_{55}^2 + \omega^2 L_{55}^2} + \frac{i\omega L_{55}}{R_{55}^2 + \omega^2 L_{55}^2} + \frac{R_{5B}}{R_{5B}^2 + \omega^2 L_{5B}^2} + \frac{i\omega L_{5B}}{R_{5B}^2 + \omega^2 L_{5B}^2} + \frac{R_{56}}{R_{56}^2 + \omega^2 L_{56}^2} + \frac{i\omega L_{56}}{R_{56}^2 + \omega^2 L_{56}^2} \right) \quad (18)$$

За допомогою струму, визначеного за формулою (17), можемо знайти напруженість магнітного поля на поверхні 2 – H_{me2} , яке входить у вирази для визначення питомої потужності теплових джерел W_2, W_{2B}, W_1 , корисної потужності P_2, P_{2B}, P_1 та енергії магнітного поля W_{M2}, W_{M2B}, W_{M1} . Аналогічно знайдемо питомі потужності, корисну потужність та енергію магнітного поля в системі 5, використовуючи для визначення напруженості магнітного поля H_{me5} струм, знайдений за формулою (18).

У випадку сумісної роботи системи 2 та 5 у формулу для визначення напруженості магнітного поля необхідно підставити значення сили струму, обчисленої за виразом (1).

При проектуванні нагрівального пристрою по системі 2 чи 5 для визначення H_{me2} чи H_{me5} струм буде дорівнювати $\dot{I}_i = \dot{I}_2$ – для системи 2 та відповідно $\dot{I}_i = \dot{I}_5$ – для системи 5.

Таким чином, визначені корисні активні струми, тобто ті, які активно впливають на нагрівання зон теплообмінника.

Для знаходження повного струму, що протікає в індукторі, тобто спожитого з мережі, необхідно також врахувати струм, що витрачається власне в самому індукторі (на нагрівання самого провідника, з якого виготовлено індуктор). Тобто повний струм визначимо так:

$$\dot{I}_i = \dot{I}_2 + \dot{I}_5 + \dot{I}_{in}, \quad (19)$$

де \dot{I}_{in} – струм, що йде на подолання опору (на нагрівання) індуктора, А.

Таким чином, остаточно схема заміщення індуктора в опалювальному приладі набуде вигляду як показано на рисунку 3. Бачимо, що схема заміщення індуктора дуже схожа зі схемою заміщення трансформатора.

Визначаємо струм, що йде на нагрівання індуктора \dot{I}_{in} . Для цього необхідно знати опір індуктора та його індуктивність [7].

Відомо, що активний опір провідника визначають так:

$$r_{in} = \rho_{in} \frac{l_{in}}{S_{in}}, \quad (20)$$

де l_{in} – довжина індуктора, м; S_{in} – площа поперечного перерізу індуктора, м²; ρ_{in} – питомий опір матеріалу індуктора, Ом · м.

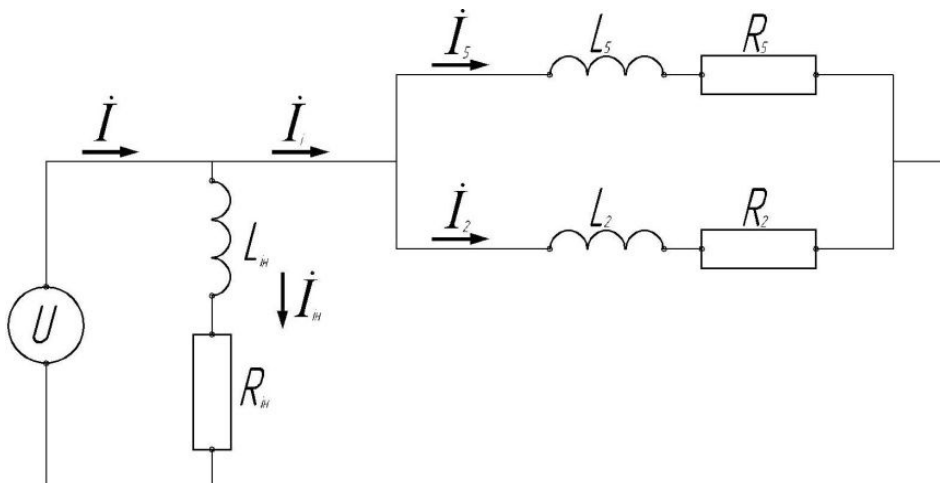


Рисунок 3. Схема заміщення індуктора

Figure 3. Circuit inductor

Відповідно довжину дроту індуктора визначаємо за формулою

$$l_{in} = 2\pi \left(R_{in} + \frac{n_{in}}{2} d_{in} \right) N_{in}, \quad (21)$$

де R_{in} – внутрішній радіус індуктора, м; n_{in} – кількість шарів обмотки індуктора; d_{in} – у випадку крутого провідника діаметр дроту, а у випадку використання шини-висота, м; N_{in} – кількість витків індуктора.

Щоб знайти реактивний опір, визначаємо індуктивність індуктора. Індуктивність визначатимемо через енергію магнітного поля.

Згідно з теоремою про повний струм в індукторі [8] отримаємо

$$a_{in} \dot{H}_{me} = \sqrt{2} N_{in} \sqrt{\dot{I}_i^2}.$$

Звідси

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2} N_{in} \sqrt{I_{ia}^2 + I_{ip}^2}}{a_{in}}. \quad (22)$$

Тоді енергію магнітного поля визначаємо так

$$W_{in} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_i H_{me}^2 V_{in}, \quad (23)$$

де V_{in} – об'єм в якому зосереджена енергія магнітного поля W_{in} , його визначаємо так

$$V_{in} = l_{in} S_{in}.$$

У результаті отримаємо

$$W_{in} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_i H_{me}^2 l_{in} S_{in}. \quad (24)$$

З другого боку, енергію магнітного поля визначаємо за формулою [7]

$$W_{in} = \frac{1}{2} L_{in} \dot{I}_i^2, \quad (25)$$

звідки отримаємо

$$L_{in} = \frac{2W_{in}}{\dot{I}_i^2}. \quad (26)$$

Використовуючи (24) та (26), індуктивність індуктора буде

$$L_{in} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_i \frac{N_{in}^2}{a_{in}^2} l_{in} S_{in}, \quad (27)$$

де a_{in} – висота індуктора, м; μ_0 – магнітна стала; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$; μ_i – магнітна проникність матеріалу провідника, для міді $\mu_i \cong 1$.

Струм, що затрачається в індукторі на його нагрівання, визначаємо за формулою

$$\dot{I}_{in} = U \left(\frac{r_{in}}{r_{in}^2 + \omega^2 L_{in}^2} + \frac{i \omega L_{in}}{r_{in}^2 + \omega^2 L_{in}^2} \right) = U \frac{1}{Z_{in}}, \quad (28)$$

де \dot{Z}_{in} – повний комплексний опір пустого індуктора, Ом.

Тепер можемо визначити струм, спожитий з мережі, за формулою

$$\dot{I} = U \left(\frac{1}{\dot{Z}_{in}} + \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_5} \right). \quad (29)$$

Висновки. У результаті отримано вирази для визначення діючого значення сили струму, що споживається з мережі, а також зведені струми, що циркулюють у кожній зоні теплообмінника. Знайшовши силу струму в індукторі, зможемо визначити потужність, що споживатиме нагрівальний прилад.

Conclusions. As a result expressions for finding the current intensity values consumed from the network and reduced currents circulating in each area of the heat exchanger have been obtained. Having found the current intensity in a inductor, we can determine the power which will be consumed by the heating device.

Список використаної літератури

1. Индукционные котлы EXPRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/induct-boilers.html>.
2. Индукционные электронагреватели «Эдисон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/elecon.html>.
3. Використання індукційного нагрівання при розробленні нових технологічних процесів і приладів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, О.І. Король, М.С. Базар // Конференція «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (16 травня 2011 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – С. 91–92.
4. Шаблій, О.М. Індукційний нагрівач [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар // Патент на корисну модель №64393 по заявці №u2011 03585 від 25.03.2011р., опубліковано Б. №21 від 10.11.2011 р.
5. Шаблій, О.М. Індукційний нагрівач [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар // Патент на корисну модель №66291 по заявці №u2011 08038 від 25.06.2011р., опубліковано Б. №24 від 26.12.2011 р.
6. Малинівський, С.М. Загальна електротехніка [Текст] / С.М. Малинівський. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 640 с.
7. Матвеев, А.М. Электричество и магнетизм [Текст] / А.М. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
8. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 263 с.

Отримано 24.04.2012